

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СИНХРОТРОН НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ СО СТАЦИОНАРНЫМ ПОЛЕМ

Н. И. ДОЙНИКОВ, Е. Г. КОМАР, Н. А. МОНОСЗОН,
Б. В. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ, Б. П. СИВКОВ

*Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова
Ленинград, СССР*

Докладчик Н. А. Моносзон

Создание проводников из тонких сверхпроводящих проволок с малыми потерями энергии переменного тока и большой средней плотностью тока открывает реальную перспективу для разработки и сооружения протонных синхротронов высоких энергий с сильным магнитным полем.

Однако, даже при наличии подобных проводников создание сверхпроводящих электромагнитов с изменяющимися во времени полями наталкивается на ряд трудностей. К ним, в частности, относится необходимость изоляции сверхпроводящих обмоток на высокое напряжение, ограничения в применении металла в качестве конструкционного материала, необходимость отведения теплопритоков, вызываемых потерями энергии переменного тока и необходимость весьма значительной реактивной мощности для возбуждения магнитного поля.

Применение для синхротронов магнитных систем, состоящих из чередующихся сверхпроводящих электромагнитов со стационарным магнитным полем и обычных с переменным полем, предложенных в РТИ и НИИЭФА, позволяет исключить проблемы, возникающие при использовании сверхпроводимости для формирования переменных магнитных полей. Однако среднее значение напряженности магнитного поля на орбите у таких синхротронов существенно меньше напряженности поля, допускаемой сверхпроводящими системами и потребность в мощных источниках активной и реактивной мощности не исключается.

В связи с этим и, учитывая малые веса сверхпроводящих электромагнитов, представляет интерес рассмотреть возможность изменения поля на орбите синхротрона путем механических перемещений сверхпроводящих электромагнитов со стационарными магнитными полями.

Оценки показывают, что для механических перемещений требуются мощности на несколько порядков меньшие, чем для возбуждения соответствующего изменяющегося во времени поля. Рассмотрим некоторые возможные варианты подобных синхротронов.

Рис. 1 поясняет устройство синхротрона, у которого изменение заворачивающего поля достигается путем синхронного поворота электромагнитов со стационарным полем.

Магнитное поле синхротрона создается последовательностью сверхпроводящих электромагнитов 1, 2, 3... с однородным полем, расположенных вдоль равновесной орбиты. При $\alpha = \frac{\pi}{2}$ вертикальная составляющая поля B_z максимальна.

При $\alpha \neq \frac{\pi}{2}$ B_z в каждом электромагните равно

$$B_z = B \sin \alpha.$$

Радиальные составляющие поля в нечетных электромагнитах B_{1r} и четных B_{2r} равны

$$B_{1r} = B \cos \alpha = B_r.$$

$$B_{2r} = -B \cos \alpha = -B_r.$$

Среднее значение радиальной составляющей поля на пару электромагнитов равно нулю.

Отношения импульса ускоренных частиц к импульсу при инжекции

$$\lambda = \frac{B_{zm}}{B_0} = \frac{\sin \alpha_m}{\sin \alpha_0}.$$

Угол α изменяется при работе ускорителя в пределах

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{2}.$$

Охлаждение обмоток и поддержание в них стабильного тока возбуждения обеспечивается с помощью соответствующих гибких подводов.

Периодическое изменение радиальной составляющей поля по длине ускорителя вызовет возмущение орбиты в вертикальной плоскости с максимальным отклонением при инжекции Δz

$$\Delta Z = \frac{\pi}{4} L_m \left(\frac{l}{L_m} \right)^2 \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\sin \alpha_m} \right)^2 - 1}.$$

где $L_m = \Sigma l$

Δz может быть доведено до достаточно малой величины при соответствующем выборе числа электромагнитов. Отклонения поля

$$\frac{\Delta B_z}{B_z} \text{ и } \frac{\Delta B_r}{B_z}$$

равны

$$\frac{\Delta B_z}{B_z} = \frac{\Delta B}{B} + \Delta z \operatorname{ctg} \alpha,$$

$$\frac{\Delta B_r}{B_z} = \frac{\Delta B}{B} \operatorname{ctg} \alpha - \Delta z.$$

Отсюда видно, что при увеличении λ ужесточается допуск на $\frac{\Delta B}{B}$ и угол рассогласования $\Delta \alpha$.

Фокусировка пучка в рассматриваемом варианте может осуществляться с помощью линз, питаемых переменным током. Для питания их необходима мощность значительно меньшая мощности, требующейся для возбуждения поля заворачивающих магнитов.

Фокусировка может быть также осуществлена с помощью квадрупольных линз поворачивающихся на угол $\frac{\alpha}{2}$ при повороте основных электромагнитов на угол α .

Средний градиент $\bar{G}$ пары одинаковых, вращающихся в противоположные стороны линз, будет равен

$$\bar{G} = G \sin \alpha,$$

где G — градиент одной линзы.

Искажения орбиты в вертикальной плоскости и поворот линз приводят к связи вертикальных и горизонтальных бетатронных колебаний. Однако, как показывают исследования, этот эффект при соответствующем выборе параметров не приводит к нарушению устойчивости.

Предельные значения λ в рассматриваемой системе ограничиваются величинами достижимых допусков $\frac{\Delta B}{B}$ и $\Delta \alpha$. Эти допуски могут быть ослаблены при введении систем коррекции поля, управляемых устройствами индикации положения пучка или другими датчиками.

Количество поворотных механизмов может быть уменьшено и допуски на угол рассогласования смягчены при использовании вращения только части магнитов и линз на соответственно большие углы.

Рис. 2 иллюстрирует вариант синхротрона с радиальным встречным перемещением соседних электромагнитов. Такая система не приводит к искажениям орбит, однако требует большего количества сверхпроводника и других материалов.

При линейном распределении индукции по ширине электромагнита (рис. 2а, 2в)

$$B = B_0 \left(1 + \frac{x}{a_0} \right)$$

для увеличения поля от значения его при инжекции B_0 (рис. 2а) до максимального B_m (рис. 2в) необходимо перемещение

$$D = a_0(\lambda - 1).$$

При движении градиент G измеряется обратно пропорционально индукции B в центре камеры

$$G = \frac{B_0}{Ba_0},$$

и для поддержания постоянства частоты бетатронных колебаний так же как и у синхротрона с поворотными магнитами необходимы регулируемые фокусирующие системы.

Магнитный поток на единицу длины магнита зависит от пределов изменения энергии при ускорении λ и составляет (без учета потоков рассеяния)

$$\Phi = B_m \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) \frac{D+d}{2} = \frac{1}{2} B_m (d + \lambda a_0).$$

Изменение градиента при движении магнитов может быть предотвращено заменой линейного распределения поля распределением по экспоненте (рис. 2с).

$$B = B_0 e^{\frac{x}{a_0}}.$$

В этом случае

$$G = \frac{1}{a_0},$$

$$D = a_0 \ln \lambda,$$

$$\Phi = B_m a_0 \left[e^{\frac{d}{2a_0}} - \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{d}{2a_0}} \right].$$

Величина нелинейного искажения на краю камеры будет

$$\frac{\partial B}{B} = e^{\frac{d_0}{2a_0}} - \left(1 + \frac{d_0}{2a_0} \right) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{d_0}{2a_0} \right)^2.$$

Ниже приведены некоторые сравнительные оценки рассмотренных вариантов сверхпроводящих синхротронов при $\lambda = 6$.

Полный ток I и максимальная линейная плотность тока i_m рассчитаны в предположении бесконечно тонкого слоя тока, протекающего на поверхности эллипса с малой полуосью $b = \frac{d}{2}$ и большой $a = \frac{D+d}{2}$.

a_0/d	$\frac{D}{d}$	$\frac{\Phi}{B_m d}$	$\frac{I M_0}{2B_m d}$	$\frac{i_m M_0}{2B_m}$	Примечания
		1	1	1	Электромагниты с синхротронным поворотом
1	5	3,5	2,25	3,1	Электромагниты с радиальным перемещением. Поле линейное
3	15	9,5	5,3	7	
5	25	15,5	8,4	10,9	
1	1,79	1,55	1,3	3,8	Электромагниты с радиальным перемещением. Поле по экспоненте
3	5,35	3,1	2,1	4,7	
5	9	4,75	3	6,3	

На рис. 3 в качестве примера показан вариант конструкции поворотных магнитов ускорителя, рассчитанного на ускорение протонов с энергией 50 ГэВ до 300 ГэВ в течение 2 секунд. Его магнитная система состоит из 1000 однометровых электромагнитов. Вес поворотной части электромагнита около 100 кг. Угловые перемещения составляют 70,5° в пределах от $\alpha_0 = 9,5^\circ$ до $\alpha_m = 80^\circ$. Магниты вращаются внутри стальных цилиндрических экранов с внутренним диаметром 29 см и внешним — 58 см, предназначенных для устранения магнитного поля во внешнем пространстве и уменьшения расхода сверхпроводника. Максимальное искажение орбиты $\Delta Z = 5$ мм.

Количество сверхпроводника при средней плотности тока в обмотке $2 \cdot 10^4$ а/см² составляет около 16 тн, вес экранов ~ 1500 тн. Максимальная мощность, необходимая для поворота магнитных систем без учета кпд и масс приводов — около 2 квт., допустимый угол рассогласования при отсутствии систем коррекции поля около 1 мин. При некотором усложнении магнитной структуры и применении 500 однометровых магнитов с угловым перемещением 105° и 250 двухметровых неподвижных, допуск на угол рассогласования может быть уменьшен вдвое.

Приведенные оценки показывают целесообразность дальнейших исследований возможности создания синхротронов, основанных на использовании перемещений сверхпроводящих электромагнитов.

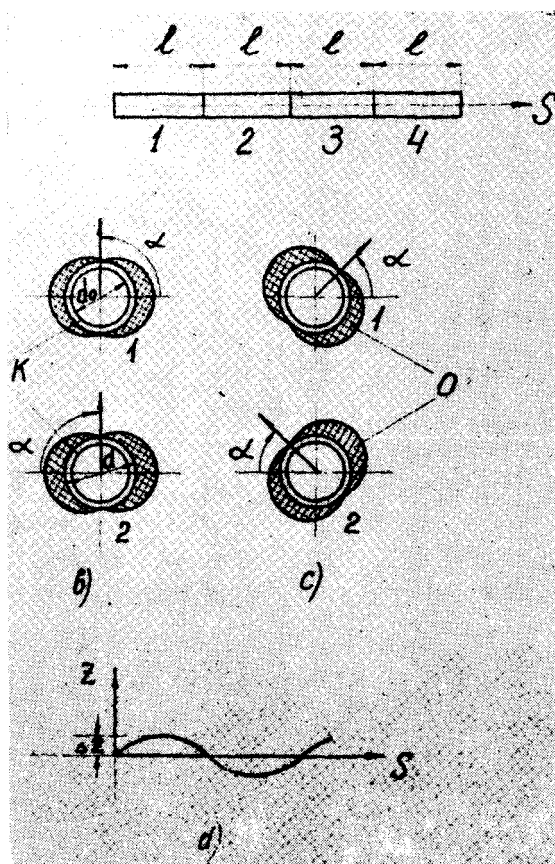


Рис. 1. Синхротрон с поворотными электромагнитами
к—камера, о—обмотка.

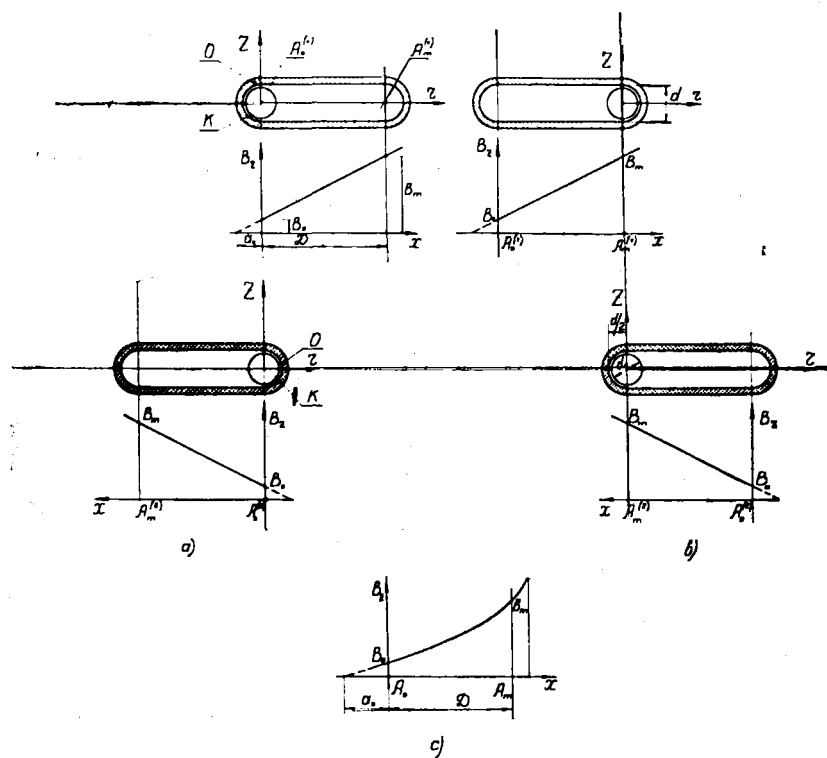


Рис. 2. Синхротон с радиальным перемещением электромагнитов
с—обмотка, к—камера.

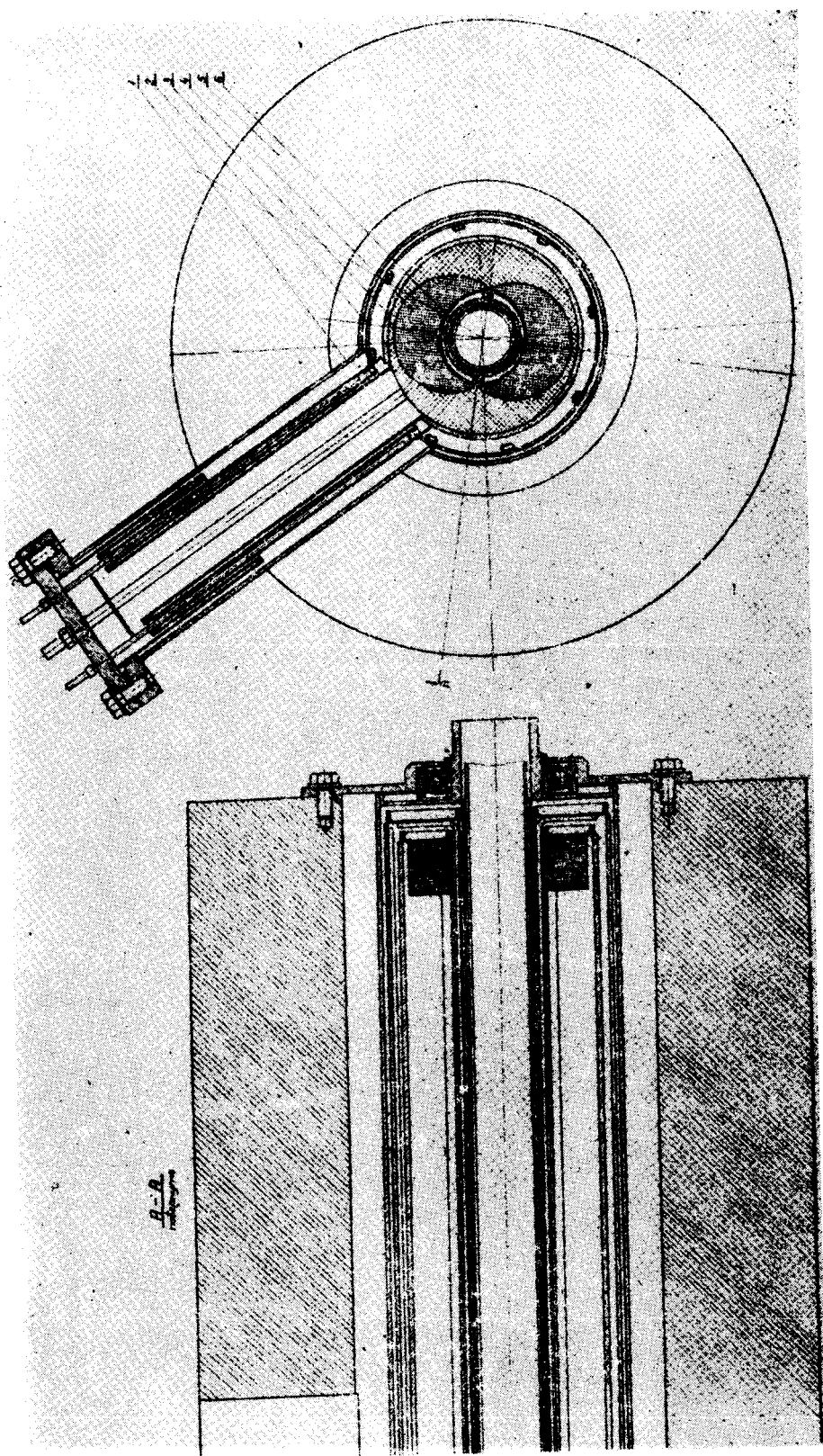


Рис. 3. Запускающий электромагнит 1, 2, 3—криостат, 4—обмотка, 5—магнитный экран, 6—вакуумная камера.